



## روکش کاری اینکونل 718 با پودر کاربید تنگستن به روش پیش نشانی با استفاده از لیزر Nd:YAG

یونس جاوید<sup>1</sup>، مجید قریشی<sup>2\*</sup>، محمدجواد ترکمنی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- مرکز علوم و فنون لیزر ایران، تهران

\* صندوق پستی 19395-1999، ghoreishi@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 فروردین 1394

پذیرش: 01 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 03 خرداد 1394

کلید واژگان:

روکش کاری لیزری

پیش نشانی

رقیق شدن پوشش

چگالی انرژی

### چکیده

فرآیندهای لیزری به صورت گسترده‌ای جهت بهبود خواص سطحی قطعات و اجزا مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرآیند روکش کاری با استفاده از پرتو لیزر روش نسبتاً جدیدی است که می‌تواند جهت بهبود خواص سطحی به کار رود. در این پژوهش، روکش کاری سطح سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل 718 توسط پودر کاربید تنگستن به روش پیش نشانی با استفاده از لیزر Nd:YAG مورد بررسی قرار گرفته است. توان متوسط لیزر، عرض پالس، فاصله‌ی نقطه‌ی کانونی از سطح قطعه و پارامترهای پیش‌نشانی به عنوان پارامترهای ورودی می‌باشند؛ درحالی‌که میزان رقیق شدن پوشش، عمق ذوب شدگی از قطعه، میزان تخلخل پوشش و تعداد ترک‌های عرضی ایجاد شده در پوشش خروجی فرآیند می‌باشند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که چگالی انرژی لیزر بر روی سطح زیرلایه مهم‌ترین پارامتری می‌باشد که تعداد ترک‌های عرضی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین تغییر میزان توان متوسط لیزر بیشترین تأثیر را بر روی میزان رقیق شدگی پوشش و تخلخل آن دارد. به علاوه، در روکش کاری سطوح بزرگ‌تر، همپوشانی به میزان 50% بین پاس‌های مجاور، بهترین نتایج را حاصل می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهند که با تنظیم دقیق پارامترهای مربوط به روکش کاری لیزری می‌توان به یک پوشش مناسب دست یافت. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از این روش و روش‌های سنتی می‌توان نتیجه گرفت که روکش کاری لیزری می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین مناسب جهت ایجاد پوشش بر روی سطوح مواد مطرح گردد.

## Preplaced laser cladding of WC powder on Inconel 718 by Nd:YAG laser

Younes Javid<sup>1</sup>, Majid Ghoreishi<sup>1\*</sup>, Mohammad Javad Torkamany<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Iranian National Center for Laser Science and Technology (INLC), Tehran, Iran

\* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, ghoreishi@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 08 April 2015  
Accepted 21 April 2015  
Available Online 24 May 2015

**Keywords:**  
Laser cladding  
Preplace  
Dilution  
Energy density

### ABSTRACT

Laser processes are widely used for improvement of surface properties of parts and components. Laser cladding, using laser as heat source, is an innovative method that can be used for improving surface properties. In this investigation, preplaced technique of laser cladding process of WC powder on Inconel 718 using pulsed Nd:YAG laser is studied. A number of parameters affect the energy density in the process, ultimately affecting the clad quality and geometry. In this study, laser average power, pulse width, focal distance, scanning speed and pre- placement factors are input parameters, while clad dilution, fusion depth, porosity and number of cracks are outputs. It is observed that hard phases are formed on Inconel surface in-situ by laser beam radiation and small changes are made in the substrate properties in a limited zone. Experimental results reveal that energy density of the laser beam is the most important factor affecting the number of cracks in laser cladding process. Also, dilution and porosity are considerably affected by laser average power. Furthermore, in multi-pass laser cladding process, 50% overlap between adjacent passes has good results. Experimental results show that by concise arrangement of input parameters, one can achieve an optimum clad layer. Thus, laser cladding process can efficiently supersede other conventional methods.

### 1- مقدمه

نیاز از قطعه می‌باشد. استفاده از جوشکاری برای این منظور باعث رقیق شدن بالای پوشش، ایجاد میکروساختار خشن و ایجاد ترک گرم می‌شود. با بکارگیری فرآیند روکش کاری می‌توان از مشکلات ذکر شده تا حد زیادی ممانعت نمود. در این روش، فازهای سخت در هنگام تابیدن پرتو لیزر به

در کاربردهای صنعتی معمولاً نیاز به قطعات با خواص سطحی ویژه همچون مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش و سختی بالا وجود دارد. یک راه حل منطقی و کم هزینه عبارت از ایجاد خواص مورد نظر تنها بر روی سطوح مورد

افزایش کسر حجمی کاربیدها، انرژی فعال سازی نفوذ بیشتر می شود [11]. در این تحقیق مشاهده شده است که با افزایش سرعت تولید، درصد دانه های کاربید تنگستن حل نشده بیشتر می شود.

در سال 2006 توبار و همکاران ایجاد لایه توسط پودر کاربید تنگستن بر روی آلیاژ پایه نیکل توسط لیزر را بررسی نموده اند [12]. نتایج حاصله نشان گر ذوب قسمت های خارجی دانه های کاربید تنگستن و نفوذ آن ها در قسمت مذاب و ایجاد فصل مشترک می باشد. با توجه به این که کربن نسبت به عناصر کاربیدزا مثل تنگستن، کروم و سلیسیوم دارای ضریب نفوذ بالاتری می باشد، تشکیل کاربیدهای پیچیده دیگر در فصل مشترک دور از انتظار نیست. البته عوامل متعددی بر روی این موضوع تأثیرگذار می باشند. در سال 2005 شیوی و همکارانش با بررسی نانوساختار پوشش کاربید تنگستن به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت سطح به حجم کاربیدها، انحلال بیشتری انجام می شود [13]. در سال 2003 نیز یانگ و همکاران در تحقیقی مشابه به این نتیجه رسیدند که استفاده از کاربیدهای کوچکتر منجر به تجزیه ی بیشتری می شود [14]. در سال 2005 وُن آکر و همکاران ایجاد پوشش کاربید تنگستن بر روی آلیاژ پایه نیکل توسط لیزر را بررسی نمودند [15]. آن ها نیز در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با کاهش اندازه ی ذرات پودر، انحلال بیشتر می گردد.

تحقیقات پلگ در سال 1999 نشان می دهد که دو نوع احتمال تخریب در روکش کاری آلیاژهای زمینه فلزی وجود دارد [16]. این دو نوع تخریب عبارت از ایجاد ترک در پوشش و جدا شدن پوشش از زمینه می باشد. پس می توان گفت که یک پوشش خوب ایجاد شده بر روی زمینه ی فلزی بایستی شامل کاربیدهای دارای پیوند قوی متصل شده به زمینه باشند. مازومدر و همکارانش تأثیر عملیات پسرگرم را در شکل گیری میکروساختار برگشت داده شده، تغییرات سختی و تنش های پسماند بر روی پوشش های چند لایه ی ایجاد شده توسط فولاد ابزار بر روی زیرلایه از روی همان جنس توسط لیزر CO<sub>2</sub> را بررسی نمودند [17]. چوئی و هوآل از روش تاگوچی برای طراحی آزمایشها جهت بررسی روکش کاری لیزری فولاد ابزار بر روی فولاد کربنی معمولی استفاده نمودند [18]. هدف آن ها تعیین تأثیر پارامترهای روکش کاری لیزری از قبیل توان لیزر، سرعت حرکت پرتو لیزر و میزان وارد شدن پودر در حوضچه ی مذاب بر روی هندسه ی پوشش، ریزساختار، تغییرات سختی و شکل گیری تخلخل بوده است.

در سال 2009 فروزمهر و همکاران تأثیر لرزش را بر روی از بین بردن عیوبی همچون نفوذ ناقص یا ذرات ذوب نشده در سطح مشترک پوشش و زیرلایه و شکل گیری حفره های گازی در طول فرآیند لیزری را بررسی نمودند [19]. نتایج تجربی حاصل از کار ایشان نشان می دهد که با استفاده از لرزش، پوشش با سختی یکنواخت و میکروساختار همگن از فولاد ابزار بر روی زمینه ایجاد شده است.

در روکش کاری لیزری به روش پیشنشانی، تنظیم دقیق و بهینه ی پارامترهای لیزری و پارامترهای فرآیند جهت دستیابی به یک لایه ی نازک پوشش با کمترین مقدار رقیق شدگی و مقاومت اتصال کافی مورد نیاز می باشد. مود پرتوی لیزر مورد استفاده مشخص کننده ی توزیع انرژی می باشد. توان لیزر و مکان نقطه ی کانونی مشخص کننده ی شدت انرژی و اندازه ی لکه ی لیزر می باشند. توان و سرعت حرکت نیز مشخص کننده ی حرارت ورودی می باشند. تمامی این فاکتورها بر توزیع حرارت گذرا، شکل حوضچه ی مذاب و هندسه ی نهایی لایه ی روکش شده توسط لیزر اثر می گذارند. لیزر پالسی به علت عرض پالس کوتاه و قله ی توان بالا، باعث ایجاد

صورت درجا ایجاد می گردند. واکنش بین ذرات مذاب در این روش در منطقه ای محدود روی می دهد. بنابراین در قطعاتی که سطح آن ها در معرض شرایط حاد خورنده یا ساییده قرار دارد، می توان بدون تغییر در خواص کل ماده، خواص سطحی قطعه کار را با لایه ای نازک از مواد مناسب بهبود بخشید. فرآیندهای روکش کاری مناسب برای کاربردهایی می باشند که تنها بخشی از قطعه نیازمند برخی از خواص در حد بالا می باشد. استفاده از جنس هایی با این خواص برای کل قطعه منجر به صرف هزینه های بالا جهت تهیه ی مواد و ماشینکاری می گردد. این هزینه ها می تواند تا حدود زیادی توسط ایجاد خواص مورد نظر بر روی سطوح مواد ارزان تر کاهش یابد. به منظور بهبود خواص سطحی اجزا و قطعات، فرآیندهای لیزری به طور گسترده ای مورد استفاده واقع می شوند. در این نوع فرآیندها مواد با سختی، مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی بالاتر توسط روش های مختلف بر روی سطح قطعات نشاند می شوند. روکش کاری سطح توسط پودر یک فلز با استفاده از پرتو لیزر می تواند به دو صورت انجام گیرد: تزریق پودر در حین تابش پرتو لیزر به سطح زیرلایه و یا پیشنشانی پودر بر روی سطح مورد نظر و سپس تابیدن پرتو لیزر. روکش کاری لیزری به روش تزریق پودر در حین فرآیند روش معمولتری می باشد، ولی روکش کاری لیزری به روش پیشنشانی نیز دارای مزایایی می باشد که آن را مناسب برای بسیاری از کاربردها می سازد. از جمله این که اولاً روکش کاری لیزری به روش پیشنشانی ساده تر بوده و نیاز به فنون ماهرانه و همچنین تجهیزات جانبی برای لیزر نمی باشد؛ دوماً در هنگام تابش پرتو لیزر، لایه ی پیشنشانی شده بر روی سطح، حرارت حاصل از تابش لیزر را تا حدود زیادی جذب نموده و مانع از ذوب شدن بیش از حد زیرلایه می گردد. در نتیجه میزان رقیق شدن پوشش توسط مواد زیرلایه کاهش می یابد [1]. همچنین جهت ایجاد پوشش بر روی قطعاتی که دارای هندسه ی پیچیده می باشند، مثل چرخدنده های مارپیچ و رزوها و همچنین بر روی مکان هایی که امکان پاشش مستقیم پودر وجود ندارد، می توان از روش پیشنشانی جهت روکش کاری لیزری استفاده نمود. ایجاد ضخامت های کمتر از 1 میلی متر با میزان رقیق شدگی پایین پوشش نیز در فرآیند روکش کاری لیزری به روش لیزری مقدور می باشد [2]. همچنین استفاده از روش روکش کاری لیزری جهت نمونه سازی سریع نیز در تحقیقی گزارش شده است [3].

در مورد تاریخچه ی فرآیند روکش کاری لیزری می توان گفت که این فرآیند توسط روش های سعی و خطا توسعه یافته است. ناناموئو در سال 1970 توسط فرآیند روکش کاری لیزری دومرحله ای، پوششی با ساختار مناسب بر روی زیرلایه ایجاد نمود [4]. بعد از آن، در سال های 1983، 1990، 1992 و 1995 تحقیقاتی بر روی روکش کاری لیزری توسط استین و همکاران صورت گرفت. در سال 1998 نیز استین از فرآیند روکش کاری لیزری برای ساخت قطعات با اشکال مختلف استفاده نمود [5]. همچنین از این روش می توان در تولید سریع نمونه های اولیه با شکل های پیچیده استفاده نمود [6]. در سال های بعد نیز مطالعات زیادی بر روی ایجاد پوشش بر روی فولاد کربنی ساده توسط لیزر صورت گرفت [7 تا 9]. در سال 2001 پرزیبیلویکر و همکاران ایجاد پوشش کاربید تنگستن بر روی آلیاژ نیکل را مورد بررسی قرار دادند [10]. نتایج حاصله نشان می دهد که با کاهش سرعت حرکت منبع حرارتی نسبت به قطعه، کاربیدهای بیشتری حل می گردند. در تحقیقات انجام شده توسط بویتر و همکاران در سال 2005 بر روی روکش کاری فولاد کربنی توسط کاربید تنگستن نیز نتایج مشابهی گزارش شده است. همچنین آن ها در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با

این پودرها برای استفاده در روکش کاری توسط روش های پاشش حرارتی، پلاسما و شعله به وجود آمده اند. از آنجایی که اصول فرآیند روکش کاری لیزری با روش های مذکور یکی می باشد، این پودرها مناسب برای استفاده در روکش کاری لیزری نیز می باشند. آنالیز شیمیایی پودر امپریت 558/074 با اندازه متوسط دانه 1 میکرومتر مورد استفاده در جدول 2 ارائه شده است. همچنین خواص فیزیکی مواد مورد استفاده در تحقیق در جدول 3 نشان داده شده است.

کاربید تنگستن (WC) نوعی ماده ی سرامیکی می باشد که در مقایسه با فلزات، دارای خواص ویژه ای از جمله مقاومت به سایش بالا، مقاومت به حرارت بالا، مقاومت به خوردگی بالا و پایداری شیمیایی بالا می باشد. برای مقایسه، خواص فیزیکی کاربید تنگستن و اینکونل 718 در جدول 3 نشان داده شده است. این خواص از گواهی نامه ی ارائه شده توسط شرکت سازنده برای این پودر استخراج گردیده است.

همان طور که در جدول 3 مشاهده می شود، چگالی کاربید تنگستن خیلی بیشتر از چگالی سوپرآلیاژ پایه نیکل می باشد. در روکش کاری لیزری مطلوب این است که در پوشش ایجاد شده، کاربید تنگستن در سطح قرار گرفته و سوپرآلیاژ پایه نیکل با درصد خیلی پایین و تنها به عنوان اتصال دهنده به فلز پایه در داخل این پوشش وجود داشته باشد. با توجه به اختلاف زیاد در چگالی کاربید تنگستن و سوپرآلیاژ پایه نیکل، امکان به بالا کشیده شدن سوپرآلیاژ پایه نیکل و ته نشین شدن کاربید تنگستن در حوضچه ی مذاب وجود دارد. البته در روکش کاری لیزری به دلیل سرعت بسیار بالای فرآیند، این مشکل تا حد بسیار زیادی مرتفع می گردد؛ اما پارامترهای مربوط به فرآیند روکش کاری لیزری می بایست طوری تنظیم گردند که این مشکل کاملاً برطرف گردد.

### 2-1-3- آماده سازی پوشش به روش پیشنشانی

در روش پیشنشانی ابتدا پودر به حالت خمیری در می آید و سپس با

جدول 1 آنالیز شیمیایی اینکونل 718

| اینکونل | %V    | %W    | %Fe   | %Mo   | %Cr   | %Mn   | %Al   |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 718     | 0/029 | 0/194 | 15/90 | 1/84  | 17/97 | 0/091 | 0/454 |
| %Ni     | %Si   | %Hf   | %Ti   | %Ta   | %Nb   | %Cu   | %Co   |
| 57/6    | 0/010 | 0/214 | 1/13  | 0/269 | 4/15  | 0/034 | 0/122 |

جدول 2 آنالیز شیمیایی پودر کاربید تنگستن

| کاربید تنگستن | %Fe     | %O      | %C  | %Co      | %Cr | %W    |
|---------------|---------|---------|-----|----------|-----|-------|
| تنگستن        | 0/8 Max | 0/2 Max | 6-5 | 11/5-8/5 | 5-3 | تبادل |

جدول 3 خواص فیزیکی مواد مورد استفاده در تحقیق

| سختی ویکرز    | دمای ذوب  | چگالی                 |
|---------------|-----------|-----------------------|
| (HV)          | (K)       | (gr/cm <sup>3</sup> ) |
| کاربید تنگستن | 1800      | 15/8                  |
| اینکونل 718   | -         | 8/19                  |
|               | 1336-1260 |                       |

جدول 4 توزیع اندازه پودر کاربید تنگستن

| توزیع اندازه پودر کاربید تنگستن امپریت 558/074 |                    |       |
|------------------------------------------------|--------------------|-------|
| D 90%                                          | اندازه به میکرومتر | 60-50 |
| D 50%                                          | اندازه به میکرومتر | 37-29 |
| D 10%                                          | اندازه به میکرومتر | 22-18 |

ضخامت مشخص بر روی سطح زیرلایه قرار می گیرد و در مرحله ی بعدی،

عمق نفوذ کافی و سرعت سرد شدن بالاتر در مقایسه با لیزر پیوسته می شود. لذا پوشش ایجاد شده توسط لیزر پالسی نسبت به لیزر پیوسته دارای ریزساختار ظریف تر می باشد. علاوه بر این، با افزایش سرعت انجماد، حد حلالیت کاهش می یابد. لذا امکان تشکیل کاربید در درصدهای کمتر از عناصر در نمودارهای فاز ی وجود دارد.

در پژوهش حاضر، روکش کاری لیزری پودر کاربید تنگستن بر روی زیرلایه ی از جنس اینکونل 718 به روش پیشنشانی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای مهم فرآیند لیزری و پیشنشانی بر روی عیوب متداول روکش کاری از جمله ترک، تخلخل و میزان رقیق شدن پوشش در این تحقیق مشخص گردیده است. با توجه به قابل کاربرد بودن روش ارائه شده توسط این تحقیق در صنعت و این که تاکنون این بررسی انجام نشده است، نتایج این تحقیق می تواند به عنوان دستاوردی مهم در صنعت مورد استفاده واقع گردد.

## 2- انجام آزمایشات

در روکش کاری لیزری به روش پیشنشانی، پودر مورد نظر با یک چسب مخلوط گردیده و یک ماده ی خمیری آماده می شود. سپس این ماده ی خمیری توسط تکنیک های خاصی با ضخامت مورد نظر روی سطح قرار داده می شود. سپس نمونه ی پیشنشانی شده برای مدت مشخصی در داخل کوره با جو کنترل شده قرار داده می شود تا رطوبت داخل آن خارج گردد و در مرحله ی تاباندن لیزر و شکل گیری پوشش، ایجاد تخلخل ننماید.

### 2-1-1- مواد، تجهیزات و نحوه ی آماده سازی پوشش به روش پیشنشانی

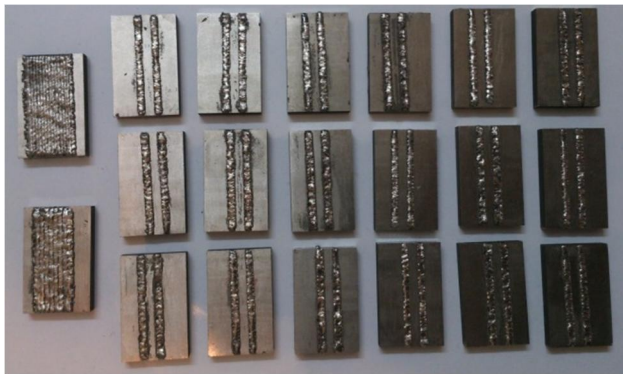
مواد اصلی مورد نیاز در این تحقیق شامل زیرلایه و پودر لازم جهت پوشش دهی می باشد. دیگر ماده ی مورد استفاده در این پژوهش عبارت از گاز محافظ جهت محافظت ناحیه ی مذاب از جو هوا می باشد. همچنین جهت تهیه ی خمیر مورد نیاز برای عمل پیشنشانی نیاز به استفاده از چسب های مناسب می باشد. از جمله مهمترین تجهیزات مورد استفاده در این تحقیق نیز عبارت از دستگاه لیزر، تجهیزات مربوط به پیشنشانی، تجهیزات برش و مانت کردن و متالوگرافی نمونه ها می باشد.

### 2-1-1-1- زیرلایه

هدف اصلی در این تحقیق، روکش کاری سطح سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل 718 با استفاده از پودر کاربید تنگستن با استفاده از لیزر به عنوان منبع حرارتی می باشد. آلیاژهای پایه نیکل خواص مکانیکی خود را تا دماهای بالا حفظ می کنند و مقاوم به خوردگی می باشند. بنابراین، این مواد برای کاربرد در محلهایی که در شرایط خوردگی و سایش دما بالا هستند، مناسب می باشند. ولی خواص سایشی آلیاژهای پایه نیکل خیلی خوب نمی باشد. با روکش کاری سطح این آلیاژ توسط پودر کاربید تنگستن می توان این خواص را بهبود بخشید. آنالیز شیمیایی اینکونل 718 مورد استفاده در این تحقیق که از طریق تست تحلیل عنصری بر روی دو نمونه به دست آمده است، در جدول 1 ارائه شده است.

### 2-1-2- ماده ی پوشش

مواد سرامیکی دارای مقاومت به سایش، مقاومت به دمای بالا، مقاومت به خوردگی و پایداری شیمیایی هستند. پودرهای سرامیکی زیادی جهت استفاده برای اهداف مختلف وجود دارد؛ کاربید تنگستن، کاربید سیلیسیم، کاربید تیتانیوم، اکسید آلومینیوم، و ... نمونه هایی از این پودرها می باشند.



شکل 1 نمونه‌های روکش کاری شده (ابعاد نمونه‌ها 40×20×5 میلی‌متر)

دست‌یابی به یک سطح صاف، د) پرداخت سطح نمونه‌ها توسط خمیر الماسه‌ی سیلیکون کارباید، ه) اچ نمودن نمونه‌ها توسط محلول ماربل.

### 3- نتایج و بحث

پارامترهای مهم در فرآیند روکش‌کاری لیزری عبارتند از توان لیزر، سرعت اسکن لیزری، قطر لکه‌ی لیزر و ... . به‌علاوه متغیرهای پیش‌نشانی نیز به عنوان پارامترهای مهم مطرح می‌باشند. در لیزرهای پالسی علاوه بر پارامترهای یاد شده، عرض پالس (زمان روشن بودن لیزر در هر پالس)، فرکانس (تعداد پالس لیزر در هر ثانیه)، انرژی پالس، قله‌ی توان و چگالی توان نیز بایستی تحت کنترل باشند. روکش‌کاری سطوح بزرگ بایستی طی چند مرحله صورت گیرد. در این موارد می‌بایست بین پاس‌های متوالی هم‌پوشانی وجود داشته باشد. این هم‌پوشانی، میزان سختی و خواص دیگر ناحیه‌ی مورد نظر را تحت تأثیر قرار می‌دهد [21]. میزان این هم‌پوشانی نیز از پارامترهای دیگری می‌باشد که در حین فرآیند روکش‌کاری بایستی تحت کنترل باشد.

پس از انجام فرآیند لیزری، نمونه‌ها تمیزکاری گردیده و سطح پوشش ایجاد شده از لحاظ وجود ترک مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، میکروگراف‌هایی از سطح پوشش ایجاد شده توسط میکروسکوپ نوری تهیه گردید. سپس نمونه‌ها برشکاری و مانت گردیده و جهت انجام تست‌های متالوگرافی آماده‌سازی شدند. در این مرحله نیز نمونه‌ها در دو حالت قبل از اچ و بعد از آن مورد بررسی قرار گرفتند. در هر دو مرحله، عکس‌هایی جهت بررسی پارامترهای روکش‌کاری تهیه گردید. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایشات، فرکانس 12 هرتز می‌باشد.

#### 3-1- تخلخل

تخلخل می‌تواند در اثر عوامل مختلف به‌وجود آید. اولاً، تخلخل ممکن است در اثر ایجاد حباب‌های گازی و محبوس شدن آن‌ها در لایه‌های منجمد شده حاصل شود. این مسئله در اثر بخار شدن چسب مورد استفاده در روش پیش‌نشانی به‌وجود می‌آید. اگر چسب مورد استفاده در حین فرآیند لیزری کاملاً تبخیر نگردد، منجر به ایجاد ناخالصی‌هایی نیز در پوشش می‌گردد. به‌وجود آمدن این تخلخل و ناخالصی‌ها منجر به افزایش تنش‌های داخلی و ترک‌ها نیز می‌گردد. مشاهده گردیده است که اغلب ترک‌های داخلی در پوشش‌ها از محل‌های تخلخل شروع می‌شوند. دوماً، هنگامی که عمل انجماد در جهات مختلف پیش‌روی می‌کند، در هنگام رسیدن آن‌ها به همدیگر، برخی مناطق مذاب در میان این نواحی منجمد شده می‌مانند. این مناطق در اثر انقباض، سبب ایجاد تنش کششی در لایه‌ی پوشش می‌گردند و ممکن است باعث ایجاد تخلخل شوند. این دو نوع تخلخل می‌تواند در لایه‌ی پوشش

لیزر بر آن تابانده می‌شود. برای این منظور از چسب‌های مخصوص استفاده می‌گردد. در این روش چسب به‌عنوان اتصال دهنده‌ی ذرات پودر به همدیگر و به زمینه می‌باشد تا در اثر جریان گاز محافظ در حین فرآیند لیزری دچار پاشش نشود. از طرف دیگر، این چسب بایستی در هنگام تاباندن پرتو لیزر و ذوب شدن هم‌زمان پودر و سطح زیرلایه، بخار شده و از حوضچه خارج شود و حفره و ناخالصی ایجاد نکند [20]. در این تحقیق از چسب سیلیکات سدیم استفاده شده است.

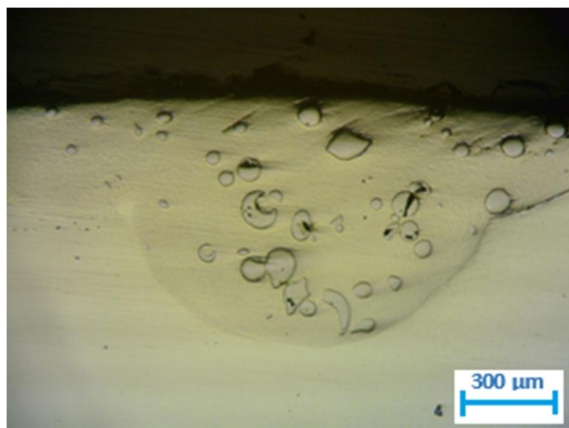
#### 2-1-4- لیزر

متداول‌ترین نوع لیزر حالت جامد، لیزر Nd:YAG می‌باشد. در این نوع لیزر نتودیم افزوده شده به یوتریم آلومینیوم گارنت ترکیبی را که برای استفاده در فرآیند ایجاد پرتو لیزر بسیار مناسب می‌باشد، ایجاد می‌کند. در این نوع لیزرها بیشترین مقدار توان برابر با 2/5 کیلو وات در حالت پیوسته و حدود 3 کیلو وات در حالت پالسی می‌باشد. لیزری که برای استفاده در این پژوهش در نظر گرفته شده است عبارت از لیزر Nd:YAG پالسی مدل IQL-10 با حداکثر توان متوسط 400 وات می‌باشد. این لیزر دارای قابلیت ایجاد پالس‌های مربعی به پهنای 0/2 الی 20 میلی‌ثانیه و فرکانس 1 تا 1000 هرتز با حداکثر انرژی 40 ژول می‌باشد. گاز آرگون در این آزمایش‌ها به‌عنوان گاز محافظ مورد استفاده قرار گرفت. این گاز محافظ به‌صورت هم‌محور با پرتو لیزر به روی سطح دمیده می‌شود تا حوضچه‌ی مذاب را از جو هوا محافظت نماید. سامانه‌ی حرکتی این لیزر دارای دقت 0/01 میلی‌متر در هر سه جهت مختصات می‌باشد.

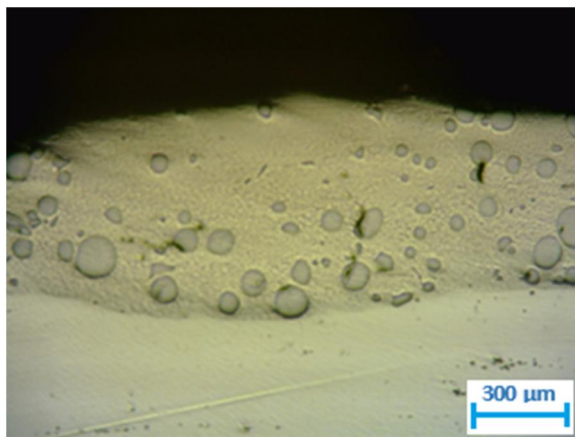
#### 2-2- نحوه‌ی انجام فرآیند

ابتدا نمونه‌هایی از جنس اینکونل 718 جهت انجام فرآیند روکش‌کاری لیزری تهیه شدند. مراحل تهیه‌ی نمونه‌های تست قبل از انجام فرآیند روکش‌کاری لیزری به قرار زیر می‌باشد: الف) بریدن نمونه‌ها در ابعاد 40×20×5 میلی‌متر توسط دستگاه وایرکات، ب) سنگ‌زنی سطح نمونه‌ها جهت رفع ناهمواری‌ها و مواد زائد، ج) شستن نمونه‌ها قبل از انجام عمل پیش‌نشانی توسط استون. پودر کاربید تنگستن توسط چسب سیلیکات سدیم و آب مقطر مخلوط گردید تا این‌که یک ماده‌ی خمیری شکل به‌وجود آید. نسبت مناسب چسب به آب بایستی در این فرآیند طی آزمایشات بدست آید. سپس ماده‌ی خمیری ایجاد شده با ضخامت یک میلی‌متر بر روی سطح قرار داده شد. سپس این نمونه‌ها جهت خشک شدن به مدت یک ساعت در دمای 100 درجه قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از خشک شدن، جهت انجام فرآیند لیزری روی میز کار لیزر بسته شدند. سپس با حرکت میز با سرعت‌های معین، این نمونه‌ها تحت تابش لیزر قرار گرفتند. نمونه‌های ایجاد شده با تنظیمات مختلف پارامترها در شکل 1 نشان داده شده است.

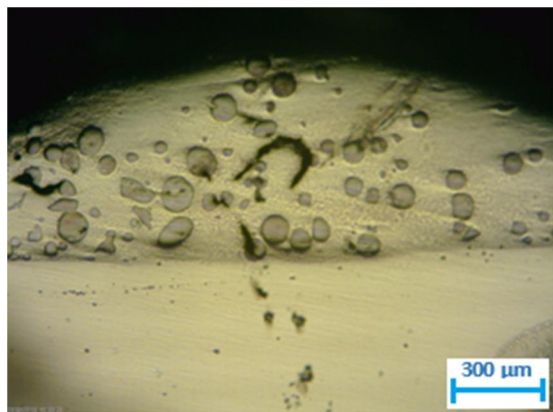
جهت بررسی میزان تخلخل، عمق نفوذ، رقیق شدگی پوشش و سایر نتایج حاصل از روکش‌کاری، نمونه‌ها جهت انجام متالوگرافی آماده‌سازی گردیدند. آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام متالوگرافی بعد از انجام فرآیند روکش‌کاری لیزری به قرار زیر می‌باشد: الف) بریدن نمونه‌ها در دو مقطع از طول روکش‌کاری شده به فاصله‌ی 15 و 25 میلی‌متر از شروع روکش‌کاری توسط دستگاه وایرکات، ب) مانت نمودن نمونه‌ها در یک نگهدارنده به قطر 25 میلی‌متر و با ارتفاع 15 میلی‌متر از جنس پلی‌وینیل کلراید، ج) سمباده نمودن تدریجی سطوح با استفاده از سمباده‌های با مش‌های مختلف جهت



شکل 3 سطح مقطع پوشش (قدرت لیزر 220 وات)



شکل 4 سطح مقطع پوشش (قدرت لیزر 198 وات)



شکل 5 سطح مقطع پوشش ایجاد شده (قدرت لیزر 176 وات)

افت خواص مکانیکی پوشش خواهد شد. در شکل 3 کاملاً واضح است که توان بالا منجر به افزایش میزان ذوب از زیرلایه و در نتیجه منجر به افزایش میزان رقیق شدن پوشش تا حد زیادی شده است.

### 3-1-2- تأثیر ارتفاع نقطه کانونی بر روی تخلخل

با افزایش ارتفاع نقطه کانونی از سطح قطعه کار، میزان چگالی انرژی جاصل بر روی لایه‌ی پیش‌نشانی شده کاهش می‌یابد. این افزایش فاصله باعث افزایش عرض پوشش ایجاد شده نیز می‌گردد. از طرفی، با افت چگالی انرژی، میزان حرارت دریافت شده توسط لایه‌ی پیش‌نشانی شده کاهش می‌یابد. افت بیشتر

مشاهده گردد.

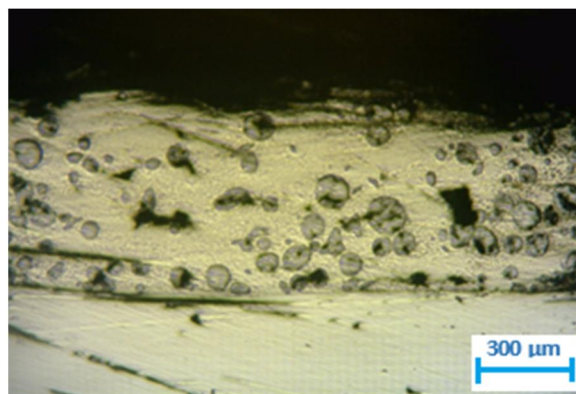
دو نوع تخلخل دیگر نیز مربوط به منطقه‌ی فصل مشترک پوشش با زمینه می‌باشد. اولین مورد وجود عیوب ریز، مثل وجود روغن یا آلودگی دیگر، بر روی سطح زیرلایه می‌باشد که تنش سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه، اتصال ماده‌ی پوشش به زیرلایه دچار مشکل می‌گردد. برای اجتناب از این نوع عیب بایستی نمونه‌ها قبل از انجام عمل پیش‌نشانی کاملاً تمیزکاری گردند. مورد دوم تخلخل هنگامی پدید می‌آید که پاس‌های دارای هم‌پوشانی جانبی در کنار هم قرار می‌گیرند. این نوع تخلخل مخصوصاً هنگامی ایجاد می‌گردد که میزان پودر مورد استفاده زیاد باشد. از این نوع تخلخل می‌توان با انتخاب نسبت عرض به ارتفاع مناسب برای لایه‌ی پوشش اجتناب نمود.

در شکل 2 تخلخل بالای ایجاد شده در اثر مناسب نبودن پارامترهای ورودی کاملاً مشهود می‌باشد. در ادامه تأثیر پارامترهای ورودی با هدف کاهش میزان تخلخل مورد بررسی قرار گرفته است.

### 3-1-1- تأثیر قدرت لیزر بر روی میزان تخلخل پوشش

میزان تخلخل ایجاد شده در ترکیب‌های مختلف پارامترهای فرآیند مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای لیزری مورد ارزیابی در این تحقیق سرعت حرکت لیزر نسبت به قطعه کار، ارتفاع نقطه کانونی از سطح و قدرت لیزر می‌باشند. جهت بررسی تأثیر قدرت لیزر بر روی میزان تخلخل پوشش، پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته شدند. در این مرحله، سرعت حرکت لیزر نسبت به قطعه کار برابر با 3 میلی‌متر بر ثانیه و ارتفاع نقطه کانونی از سطح قطعه برابر با 4 میلی‌متر می‌باشد. در شکل‌های 3، 4 و 5 سطح مقطع پوشش‌های ایجاد شده با قدرت‌های متوسط مختلف نشان داده شده است.

در شکل‌های 3 تا 5 پارامترهای مربوط به ارتفاع و سرعت ثابت بوده و تنها پارامتر متغیر قدرت لیزر می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، با کاهش قدرت لیزر، میزان تخلخل در پوشش ایجاد شده افزایش می‌یابد. در شکل 3 توان متوسط برابر با 220 وات می‌باشد. در شکل 4 توان لیزر کاهش یافته و برابر با 198 وات می‌باشد. شکل 5 نیز با توان متوسط برابر با 176 وات ایجاد گردیده است. مشاهده می‌گردد که افزایش توان متوسط منجر به دریافت انرژی بیشتری در قطعه می‌گردد. همین امر می‌تواند یکی از دلایل کاهش تخلخل نیز باشد. البته واضح است که کاهش تخلخل در هنگام افزایش قدرت لیزر تا یک حدی ادامه خواهد داشت. همچنین با افزایش عرض پالس، میزان رقیق شدن پوشش نیز افزایش خواهد یافت که این امر منجر به



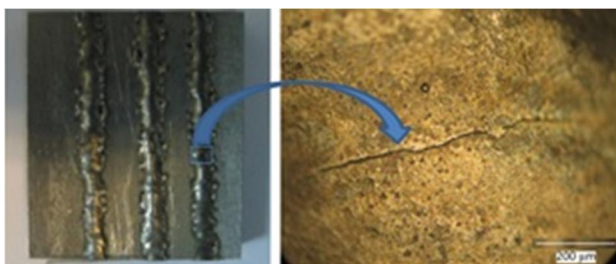
شکل 2 سطح مقطع پوشش با قدرت لیزر 167 وات، سرعت 5 میلی‌متر بر ثانیه و ارتفاع نقطه کانونی 5 میلی‌متر از سطح قطعه

### 2-3- ترک‌های عرضی

تشکیل ترک‌ها در لایه‌های پوشش عمدتاً به دلیل تنش‌های حرارتی بالای ایجاد شده در اثر گرادبان حرارتی بالای حاصل از فرآیند سرد شدن و تفاوت بین ضرایب انبساط حرارتی می‌باشد. مخصوصاً لایه‌هایی که دارای ذرات سخت و شکننده می‌باشند، مستعد برای ترک می‌باشند. لایه‌های سرامیکی نیز در مورد ترک آسیب‌پذیر می‌باشند. دلیل این امر شکل پذیری محدود به همراه اختلاف بالای ضریب انبساط حرارتی آن در مقایسه با فلزات می‌باشد. نمونه‌ی ترک عرضی با بزرگنمایی 200 برابر در شکل 8 نشان داده شده است. سطح نمونه‌ها بعد از انجام فرآیند روکش‌کاری لیزری از لحاظ وجود ترک مورد ارزیابی قرار گرفت. پوشش‌های ایجاد شده دارای ترک‌های عرضی (عمود بر جهت حرکت لیزر) می‌باشند. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای لیزری بر روی تعداد ترک‌های به وجود آمده در لایه‌ی پوشش مورد بررسی واقع شد. برای این منظور، نمونه‌هایی که تحت پارامترهای مختلف روکش‌کاری شده بودند، زیر میکروسکوپ قرار گرفته و تعداد ترک‌های ایجاد شده در طول 35 میلی‌متر از پوشش ایجاد شده شمارش گردید.

میزان انرژی حرارتی دریافت شده توسط قطعه‌کار در روکش‌کاری لیزری ارتباطی مستقیم با تعداد ترک‌های ایجاد شده دارد. پارامترهای لیزری که بر روی میزان انرژی دریافتی قطعه تأثیر دارند عبارتند از توان متوسط لیزر، ارتفاع نقطه‌ی کانونی از سطح قطعه‌کار، عرض پالس، سرعت حرکت لیزر و فرکانس. در آزمایشات این بخش، سرعت حرکت لیزر و فرکانس آن ثابت و به ترتیب برابر با 3 میلی‌متر بر ثانیه و 12 هرتز نگهداشته شده‌اند. در اینجا پارامتری با عنوان چگالی انرژی تعریف می‌گردد که حاصل از میزان انرژی ایجاد شده تقسیم بر مساحت لکه‌ی لیزر بر روی سطح قطعه‌کار می‌باشد. با توجه به این که میزان چگالی انرژی با تغییر مقدار توان متوسط، عرض پالس و همچنین فاصله‌ی نقطه‌ی کانونی از سطح زیرلایه (اندازه‌ی لکه‌ی لیزر بر روی سطح) تغییر می‌کند، تعداد ترک‌ها با تغییرات میزان چگالی انرژی شمارش شده و در نمودار شکل 9 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی انرژی، میزان ترک‌ها کاهش می‌یابند. کاهش تعداد ترک‌ها در اثر افزایش چگالی انرژی دارای دو دلیل اصلی می‌باشد: کاهش سرعت سرد شدن و افزایش رقیق شدن پوشش توسط مواد زیرلایه. کاهش سرعت سرد شدن باعث تنش‌های پسماند ایجاد شده در لایه‌ی پوشش می‌گردد و از این‌رو باعث کاهش میزان ترک‌ها می‌شود. افزایش میزان رقیق شدن پوشش نیز در این پژوهش به دلیل این که زیرلایه نسبت به پوشش دارای شکل پذیری بسیار بالاتری است، منجر به کاهش تعداد ترک‌ها خواهد شد. البته بایستی توجه داشت که افزایش میزان رقیق شدن پوشش باعث افت خواص مکانیکی پوشش خواهد شد. بنابراین، میزان رقیق شدن پوشش نیز از جمله پارامترهای است که بایستی در این فرآیند تحت کنترل قرار گیرد.

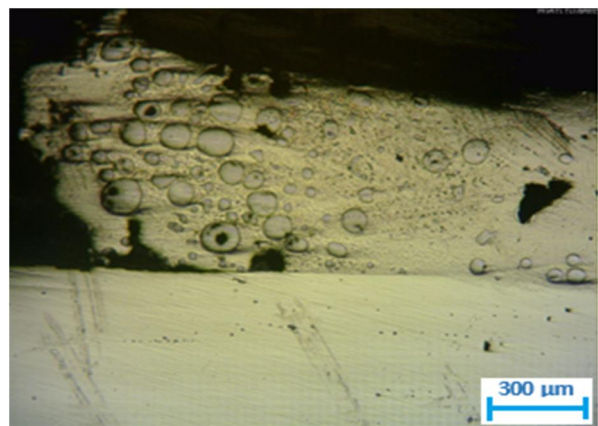


شکل 8 ترک‌های عرضی مشاهده شده در بزرگنمایی 200 برابر

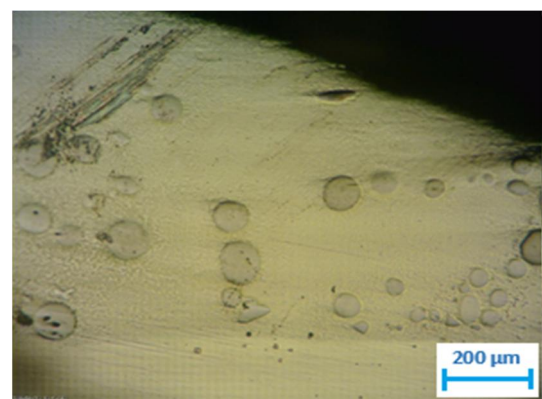
میزان چگالی انرژی باعث می‌گردد که حرارت ایجاد شده مخصوصاً در قسمت‌های لبه پایین‌تر از حد مورد نیاز باشد. در شکل‌های 6 و 7 میزان سرعت لیزر و توان لیزر ثابت و به ترتیب برابر با 3 میلی‌متر بر ثانیه و 198 وات می‌باشد.

مقایسه شکل 6 و شکل 7 نشان می‌دهد که با کاهش ارتفاع نقطه‌ی کانونی از سطح قطعه، میزان تخلخل کاهش می‌یابد. کاهش ارتفاع نقطه‌ی کانونی باعث تمرکز انرژی ورودی می‌گردد و بنابراین منجر به کاهش تخلخل می‌گردد. همچنین کاهش ارتفاع نقطه‌ی کانونی باعث افزایش میزان رقیق شدن پوشش و نیز کاهش عرض پوشش و در نتیجه‌ی آن، کاهش میزان سرعت فرآیند می‌گردد. از طرف دیگر، با افزایش فاصله نقطه‌ی کانونی از سطح، اندازه‌ی لکه‌ی لیزر روی سطح افزایش می‌یابد و در نتیجه سطح روکش‌کاری شده بزرگتر شده و بازدهی بیشتر می‌گردد. از آنجایی که سرعت حرکت لیزر، عرض پالس و ارتفاع نقطه‌ی کانونی از سطح هر سه بر روی انرژی ورودی و در نتیجه میزان تخلخل و رقیق شدن پوشش اثر می‌گذارند، بایستی مقدار مناسب این پارامترها در ارتباط با همدیگر انتخاب گردند.

در شکل 7 میزان ارتفاع نقطه کانونی از سطح قطعه‌کار برابر با 3 میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص می‌باشد، حرارت کافی توسط لایه‌ی پیش‌نشانی شده دریافت گردیده و این امر سبب اتصال خوب پوشش به زیرلایه و کاهش میزان تخلخل در آن شده است. در شکل 7 میزان ارتفاع نقطه کانونی از سطح قطعه‌کار برابر با 6 میلی‌متر می‌باشد. در این شکل ایجاد تخلخل زیاد و عدم اتصال کامل بین پوشش و زیرلایه مخصوصاً در قسمت لبه‌های پوشش به سبب پایین بودن چگالی انرژی مشهود می‌باشد.



شکل 6 سطح مقطع پوشش (ارتفاع نقطه کانونی 6 میلی‌متر)



شکل 7 سطح مقطع پوشش (ارتفاع نقطه کانونی 3 میلی‌متر)

### 3-3- رقیق شدن پوشش

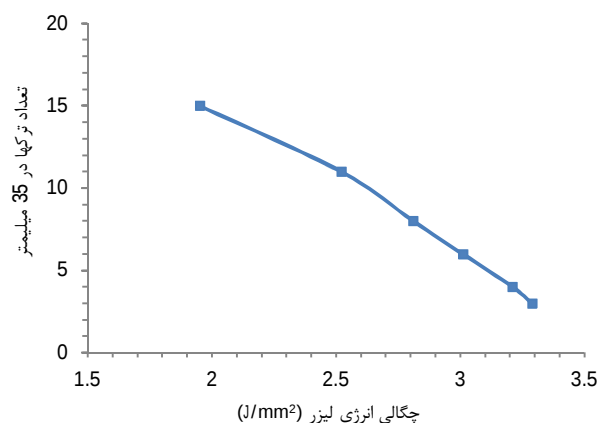
میزان رقیق شدن پوشش از پارامترهای مهم در تعیین کیفیت فرآیند روکش کاری می باشد. رقیق شدن ماده پوشش به صورت میزان وارد شدن ماده ی زمینه در پوشش ایجاد شده و یا به عبارت دیگر، میزان عدم خلوص ماده ی پوشش شده تعریف می شود که در نهایت باعث افت خواص مکانیکی مورد نظر می گردد. بنابراین کنترل دقیق میزان رقیق شدگی در فرآیند روکش کاری لیزری امری ضروری می باشد. با فرض آمیختن ایده آل درون حوضچه ی مذاب، ضریب رقیق شدگی ( $d$ ) به صورت نسبت حجم ذوب شده از ماده ی زمینه به حجم کل حوضچه ی مذاب تعریف می شود.

برای اندازه گیری میزان رقیق شدن پوشش توسط عناصر زیرلایه در منابع مختلف، روش های دیگری نیز از جمله هندسه ی لایه ی روکش شده مطرح شده است [20]. در این روش میزان رقیق شدگی با نسبت عمق روکش کاری شده ( $d_c$ ) بر ارتفاع کل لایه ی پوشش ( $t_c$ ) مطابق با رابطه (1) تعریف می شود. در شکل 10 پارامترهای مورد استفاده در تعریف میزان رقیق شدن پوشش نشان داده شده اند.

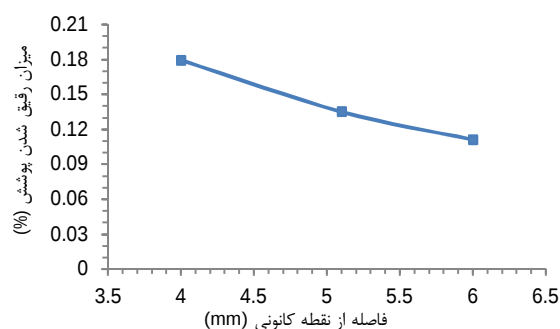
$$d = d_c / t_c \quad (1)$$

### 3-3-1- تغییرات میزان رقیق شدن پوشش با تغییرات توان لیزر

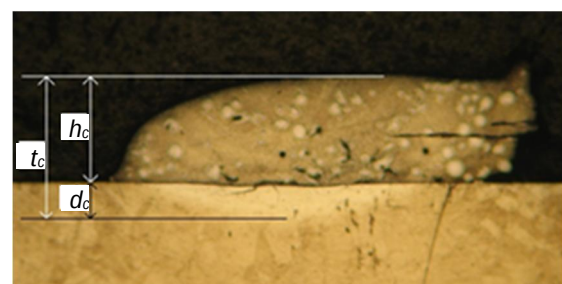
با افزایش توان لیزر، میزان انرژی دریافتی توسط سطح قطعه کار افزایش می یابد. در نتیجه، همان طور که انتظار می رود، عمق ذوب شده در زیرلایه افزایش می یابد و بنابراین میزان رقیق شدن پوشش افزایش می یابد. همان طور که در شکل 11 مشخص می باشد، با افزایش توان متوسط، شیب افزایش مقدار رقیق شدن افزایش می یابد. دلیل این امر را به این صورت می توان توجیه نمود که با گرم تر شدن مواد، میزان جذب پرتوی لیزر افزایش می یابد.



شکل 11 تغییرات میزان رقیق شدن پوشش با تغییرات توان لیزر



شکل 12 تغییرات میزان رقیق شدن پوشش با تغییرات فاصله از نقطه ی کانونی



شکل 10 سطح مقطع لایه ی روکش شده جهت تعریف هندسه ی پوشش  $h_c$ : ارتفاع پوشش از سطح،  $d_c$ : عمق ذوب در زیرلایه،  $t_c$ : ارتفاع کل پوشش

باعث می‌گردند که حرارت بالاتری به سطح قطعه برسد. در نتیجه‌ی این کار، لایه‌ی پوشش به اندازه‌ی کافی ذوب می‌گردد، ناخالصی‌ها راحت‌تر به سطح حوضچه‌ی مذاب می‌آیند، لایه‌ی پوشش و زیرلایه به‌خوبی ترکیب گردند و بنابراین احتمال ایجاد ترک کاهش می‌یابد. همچنین حباب‌های گازی فرصت کافی جهت خروج از مذاب را پیدا می‌کنند و در نتیجه تخلخل کاهش می‌یابد. ولی از طرف دیگر افزایش انرژی ورودی سبب می‌گردد که میزان رقیق شدگی پوشش افزایش یابد، میکروسختی کاهش یابد و دانه‌بندی کریستال‌ها درشت‌تر شود. همچنین احتمال سوختن برخی از عناصر به‌خاطر دمای بالا افزایش می‌یابد و بنابراین مزایای کار لیزری از بین می‌رود. کاهش ارتفاع نقطه‌ی کانونی از سطح قطعه نیز همین تأثیرات را بر روی نتایج دارد. همچنین مشاهده گردید که در هنگام ایجاد یک سطح پوشش داده شده که در آن بایستی پاس‌ها مقداری هم‌پوشانی داشته باشند، برخی از عیوب، مثل ترک‌های سطحی و تخلخل از بین می‌روند؛ ولی این هم‌پوشانی اثری بر روی ترک‌های عمیق‌تر و بزرگ‌تر ندارد. بنابراین مشاهده می‌گردد که پارامترهایی که باعث کاهش ترک و تخلخل می‌گردند، از طرف دیگر منجر به افزایش میزان رقیق شدن پوشش و در نتیجه افت خواص مکانیکی پوشش می‌شوند. بنابراین بایستی یک مقدار مناسب برای هر کدام از پارامترها به‌دست آید.

سطح مقطع پوشش ایجاد شده در بهترین تنظیم پارامترها در شکل 14 ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در این آزمایش، پوشش عاری از تخلخل به‌دست آمده است. همچنین در این آزمایش، مقدار رقیق شدن پوشش برابر با 7% مشاهده گردید.

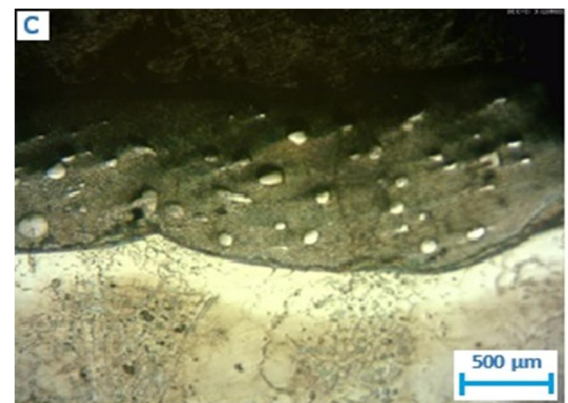
#### 5- نتیجه گیری

1- با کاهش ارتفاع نقطه‌ی کانونی از سطح قطعه‌کار، میزان ترک و تخلخل

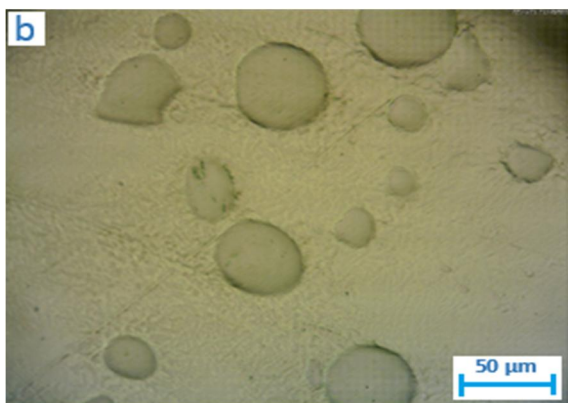
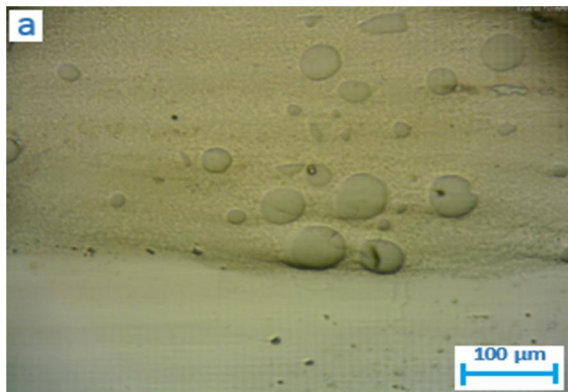
میکروگراف‌های نشان داده شده در شکل 13 نشان‌گر کاهش میزان تخلخل و ترک‌ها با افزایش درصد هم‌پوشانی می‌باشد؛ ولی تأثیر افزایش میزان هم‌پوشانی بر روی کاهش تخلخل به مراتب بیشتر از کاهش ترک‌ها می‌باشد. از طرف دیگر، با افزایش میزان هم‌پوشانی، بازدهی فرآیند کاهش یافته و میزان رقیق شدن پوشش افزایش می‌یابد. مشاهده گردید که با افزایش میزان هم‌پوشانی از 30% به 50%، میزان تخلخل در پوشش کاهش می‌یابد. افزایش میزان هم‌پوشانی از 50% به 70% تأثیری بر روی میزان تخلخل نداشته و باعث افزایش میزان رقیق شدن پوشش می‌گردد. همچنین ایجاد ترک در برخی از مقاطع نمونه در اثر این افزایش هم‌پوشانی مشاهده گردیده است.

#### 4- ایجاد پوشش مناسب

به‌طور کلی می‌توان گفت که توان بالای لیزر و سرعت حرکت پایین لیزر



شکل 13 اثر هم‌پوشانی پاس‌ها (a: 30%, b: 50% و c: 70% هم‌پوشانی)



شکل 14 سطح مقطع پوشش با توان 198 وات، سرعت 3 میلی‌متر بر ثانیه و ارتفاع نقطه کانونی 4 میلی‌متر از سطح قطعه‌کار (a: بزرگنمایی 50 برابر و b: 100 برابر)

- process, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 41, pp. 849–867, 2004.
- [4] D.S. Gnanamutha, *Cladding*, US Patent No. 3952180, 1976.
- [5] W.M. Steen, *Laser material processing*, Springer, New York, 1998.
- [6] F. Abe, K. Osakada, M. Shiomi, K. Uematsu, M. Matsumoto, The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, pp. 210–213, 2001.
- [7] L. Zhang, Effect of niobium on the microstructure and wear resistance of iron-based alloy coating produced by plasma cladding, *Materials Science and Engineering*, Vol. A490, pp. 57–61, 2008.
- [8] J. Powell, W.M. Steen, Lasers in Metallurgy, *The Metallurgical Society of AIME*, Warrendale PA, pp. 94–104, 1981.
- [9] Q.I. Yong-Tian, Z. Zeng-da, Microstructure and wear properties of laser coating reinforced by Ti (CxN1-x) on adamite roller, *International Journal of Iron and Steel Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 78–82, 2009.
- [10] J. Przybylowics, J. Kusinski, Structure of laser clad tungsten carbide composite coatings, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, pp. 154–160, 2001.
- [11] S. Buytoz, M. Ulutan, M.M. Yildirim, Dry Sliding wear behavior of TIG welding clad WC composite coatings, *Applied Surface Science*, Vol. 252, pp. 1313–1323, 2005.
- [12] M.J. Tobar, C. Alvarez, J.M. Adamo, G. Rodriguez, A. Yanez, Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi-WC coatings on stainless steel, *Surface and Coating Technology*, Vol. 200, pp. 6313–6317, 2006.
- [13] P.H. Shipway, D.G. McCartney, T. Sudprasert, Sliding wear behavior of conventional and nanostructural HAOF sprayed WC-Co Coatings, *Wear*, Vol. 259, pp. 20–27, 2005.
- [14] Q. Yang, T. Senda, A. Ohmori, Effect of carbide grain size on microstructure and sliding wear behavior of HAOF-sprayed WC-12% Co coatings, *Wear*, Vol. 254, pp. 23–34, 2003.
- [15] K. Van Acker, D. Vanhoyweghen, R. Persoons, J. Vangrunderbeek, Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings, *Wear*, Vol. 25, 194–202, 2005.
- [16] J. Pelleg, Reactions in the matrix and interface of the Fe-SiC metal matrix composite system, *Materials Science and Engineering*, Vol. A269, pp. 225–241, 1999.
- [17] J. Mazumdar, J. Choi, K. Nagarathnam, J. Koch, D. Hetzner, The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components, *Journal of Operations Management*, pp. 55–60, 1997.
- [18] J. Choi, Y. Hua, Dimensional and material characteristics of direct deposited H13 tool steel by CO<sub>2</sub> laser, *Journal of Laser Applications*, Vol. 16, No. 4, pp. 245–251, 2004.
- [19] E. Foroozmehr, D. Lin, R. Kovacevic, Application of vibration in the laser powder deposition process, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 11, pp. 38–44, 2009.
- [20] M. Schneider, *Laser Cladding with Powder*, PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 1998.
- [21] J.C. Ion, Laser processing of engineering materials-principles, procedure and industrial application, *Elsevier Butterworth-Heinemann*, Oxford, UK, 2005.

کاهش می‌یابد، ولی عرض ناحیه‌ی روکش‌کاری شده نیز کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله‌ی نقطه‌ی کانونی از سطح قطعه‌کار، میزان رقیق شدن پوشش با شیب تقریباً ثابتی کاهش می‌یابد. مناسب‌ترین ارتفاع برابر با 4 میلی‌متر از سطح قطعه حاصل گردید.

2- با کاهش سرعت حرکت لیزر، میزان ترک و تخلخل کاهش می‌یابد؛ ولی میزان رقیق شدن پوشش افزایش می‌یابد. سرعت حرکت لیزر برابر با 3 میلی‌متر بر ثانیه بهترین نتایج را حاصل نمود.

3- با توان 198 وات، سرعت 3 میلی‌متر بر ثانیه و ارتفاع نقطه کانونی 4 میلی‌متر از سطح قطعه‌کار، پوشش عاری از تخلخل با میزان رقیق شدگی برابر با 7٪ ایجاد گردید.

4- در هنگام روکش‌کاری سطوح بزرگ، همپوشانی پاس‌های مجاور به میزان 50٪ بهترین نتایج را از نظر کاهش عیوب و افزایش بازدهی حاصل نمود.

5- افزایش فاصله‌ی نقطه‌ی کانونی از سطح قطعه تا یک حد، باعث افزایش عرض پوشش می‌گردد. افزایش بیش از یک حد مشخص، باعث ایجاد تخلخل مخصوصاً در لبه‌های پوشش خواهد شد.

6- با افزایش توان لیزر، عرض پوشش افزایش می‌یابد؛ ولی شیب این افزایش به‌صورت کاهنده می‌باشد. تأثیر افزایش عرض پالس بر روی خروجی‌های فرآیند مشابه با افزایش توان می‌باشد.

## 6- تشکر و قدردانی

از مرکز علوم و فنون لیزر ایران که امکان آزمایش‌ها را در این پژوهش فراهم نمودند، سپاس‌گزاری می‌گردد.

## 7- مراجع

- [1] J. Powell, P.S. Henry, W.M. Steen, Laser cladding with preplaced powder: analysis of thermal cycling and dilution effects, *Surface Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 141–9, 1988.
- [2] H.C. Man, K.H. Leong, K.L. Ho, Process monitoring of powder pre-paste laser surface alloying, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46, pp. 739–745, 2008.
- [3] E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin, 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the